

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
13 octobre 2005 (13.10.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2005/096123 A2**

(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : **G06F 1/12**

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2005/000379

(22) Date de dépôt international :  
17 février 2005 (17.02.2005)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
0402189 3 mars 2004 (03.03.2004) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :  
**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)** [FR/FR]; 3, rue Michel Ange,  
F-75794 PARIS CEDEX 16 (FR). **UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE (UTC)** [FR/FR];  
BP 20529, F-60205 COMPIEGNE (FR).

(72) Inventeurs; et

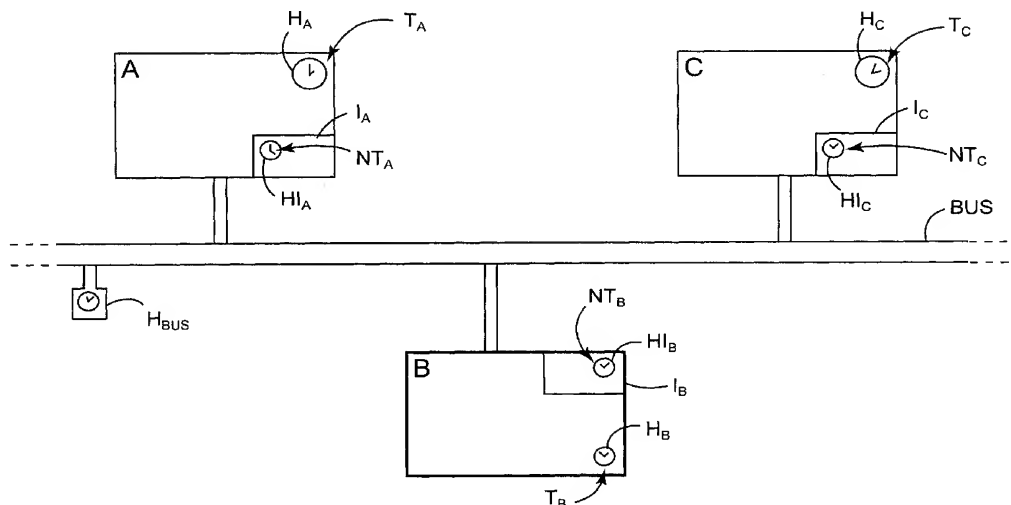
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **BONNI-FAIT, Philippe** [FR/FR]; 25, rue Jules Ferry, F-60610 LA CROIX SAINT OUEN (FR). **CRUBILLE, Paul François Pierre** [FR/FR]; 45, rue de l'Impératrice Eugénie, F-60350 PIERREFONDS (FR). **CHERFAOUI, Véronique Noëlle Marie** [FR/FR]; 7, rue Gaston et Marguerite Cahen, F-60000 BEAUVAIS (FR). **GNING, El Hadji Amadou** [SN/FR]; 4, rue Pierre et Marie Curie, F-60200 COMPIEGNE (FR). **SHAWKY, Mohamed** [FR/FR]; 5, Impasse Jean de la Fontaine, F-60610 LA CROIX SAINT OUEN (FR). **BEZET, Olivier Michel** [FR/FR]; 30, rue Lakanal, F-18410 ARGENT SUR SAULDRE (FR). **BRISOT, Géry** [FR/FR]; 1, rue du Bois, F-60350 CHELLES (FR).

(74) Mandataires : **CABINET ORES** etc.; 36, rue de St. Petersbourg, F-75008 PARIS (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR THE SYNCHRONISATION OF DATA, SUCH AS DISTRIBUTED DATA, TAKING ACCOUNT OF CLOCK DRIFTS AND INACCURACIES

(54) Titre : PROCEDE DE SYNCHRONISATION DE DONNEES, NOTAMMENT DISTRIBUEES, PRENANT EN COMPTE LES IMPRECISIONS ET DERIVES DES HORLOGES.



(57) Abstract: The invention relates to a method of matching the local time of a first machine (B) having a first clock (H<sub>B</sub>) and the time of a second machine (A) having a second clock (H<sub>A</sub>). The invention also relates to a method of synchronising data recorded and dated by the first machine (B) in relation to the local time of the second machine (A). In order to enable greater flexibility and robustness, the inventive method does not involve the synchronisation of the clocks (H<sub>A</sub>, H<sub>B</sub>), but instead consists in matching the times indicated by said clocks according to intervals. Moreover, in order to establish said match, a non-monotonic time reference can be produced by the clock of a synchronous bus, connecting the two machines (and optionally other devices) at least temporarily.

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/096123 A2



(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,

ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée :**

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

---

(57) **Abrégé :** La présente invention porte sur un procédé de mise en correspondance entre le temps local d'une première machine (B), ayant une première horloge ( $H_B$ ), et celui d'une deuxième machine (A), ayant une deuxième horloge ( $H_A$ ). L'invention porte également sur un procédé de synchronisation entre des données enregistrées et datées par ladite première machine (B) par rapport au temps local de ladite deuxième machine (A). Afin de permettre une plus grande flexibilité et robustesse, ce procédé ne comporte pas une synchronisation desdites horloges ( $H_A$ ,  $H_B$ ), mais se base sur l'établissement d'une correspondance " par intervalles " entre les temps qu'elles indiquent. Pour établir cette correspondance, une référence temporelle non-monotone peut être constituée par l'horloge d'un bus synchrone, reliant au moins temporairement les deux machines (et éventuellement d'autres dispositifs).

**PROCEDE DE SYNCHRONISATION DE DONNEES, NOTAMMENT  
DISTRIBUEES, PRENANT EN COMPTE LES IMPRECISIONS ET DERIVES  
DES HORLOGES.**

L'invention porte sur un procédé pour déterminer une  
5 correspondance entre les temps indiqués par les horloges internes d'une  
pluralité de machines reliées à un réseau, telles que des capteurs ou des  
ordinateurs, ainsi que sur un procédé de synchronisation des données  
provenant desdites machines. Ces deux types de procédés sont intimement  
liés, le deuxième constituant une application directe du premier.

10 Dans ce contexte, «synchroniser des données» signifie les  
ordonner chronologiquement en fonction de leur temps d'acquisition ; dans un  
sens plus restreint, il signifie également «dater» ces mêmes données par  
rapport à une référence temporelle unique. « Synchroniser des horloges »,  
par contre, signifie forcer ces dernières à indiquer le même temps à un instant  
15 donné.

Un procédé de synchronisation des données est nécessaire,  
par exemple, dans le domaine de la validation des dispositifs d'aide à la  
conduite automobile. Pour étudier l'influence de ces dispositifs sur le  
comportement d'un conducteur, des voitures automobiles de test sont  
20 équipées de différents capteurs reliés en réseau et permettant d'acquérir à la  
fois des informations sur le véhicule (vitesse moyenne, accélération...), sur  
l'interaction avec d'autres véhicules (distance et vitesse relatives...) et sur le  
comportement du conducteur (temps de réaction, direction du regard...). Les  
données acquises par ces différents capteurs et celles enregistrées par les  
25 dispositifs d'aide à la conduite doivent être synchronisées pour pouvoir être  
exploitées par un ergonome, et la précision de la synchronisation doit être  
meilleure qu'une milliseconde, et de préférence meilleure que 100  $\mu$ s, pour  
des cadences d'acquisition des données pouvant atteindre 1 kHz. En même  
temps, on souhaite utiliser des dispositifs matériels standard et disposer d'une  
30 grande flexibilité, permettant de reconfigurer le réseau d'acquisition en cours  
d'utilisation, et d'une grande robustesse vis-à-vis des pannes et des  
problèmes de connexion.

La solution la plus évidente au problème de la synchronisation des données provenant d'une pluralité de dispositifs consiste à synchroniser toutes les horloges. Chaque dispositif attribue une « date » aux données qu'il enregistre et, comme les horloges sont synchronisées entre elles, toutes les dates peuvent être directement comparées. Dans ce contexte, le problème de déterminer une correspondance entre les temps locaux ne se pose pas, car tous ces temps coïncident sensiblement.

La synchronisation des horloges peut être effectuée de façon matérielle ou logicielle : une introduction générale à ces techniques est fournie dans l'article de J.A. Fonseca et P. Fonseca « An overview of clock synchronization solutions », 4<sup>th</sup> IFAC International Symposium, Sicica, Argentina, 2000.

Les solutions matérielles sont basées sur l'utilisation d'un signal d'horloge externe, commun à tous les dispositifs. De cette façon on peut obtenir une précision très élevée, par exemple par l'utilisation d'une horloge atomique, telle que celle du système GPS. Par contre, ces solutions présentent l'inconvénient de demander un matériel dédié : il n'est pas possible de brancher au réseau des dispositifs qui ne sont pas conçus pour utiliser un signal d'horloge externe.

Les solutions logicielles comportent l'utilisation d'horloges logicielles (variables stockées en mémoire) pilotées par l'horloge « matérielle » de chaque dispositif connecté au réseau. Ces horloges logicielles sont synchronisées, de manière à indiquer approximativement le même temps à tout instant. Parmi ces solutions, on peut encore distinguer deux classes :

- soit on effectue une seule synchronisation au début de la session d'utilisation du réseau, et on suppose de pouvoir négliger les dérives des horloges ;
- soit on effectue également des resynchronisations en cours d'utilisation ; il s'agit de la technique adoptée, par exemple, par le protocole NTP (Network Time Protocol).

En ce qui concerne la première classe de solutions, l'hypothèse de dérives négligeables est difficilement vérifiée, du moins pour des durées d'acquisition de plusieurs heures et lorsqu'on utilise des ordinateurs du commerce : les horloges de ces derniers présentent des dérives qui peuvent atteindre les 300  $\mu$ s/s, soit plus d'une seconde par heure. Remplacer ces horloges par des composantes de meilleure qualité revient à une solution matérielle, coûteuse et peu flexible.

La seconde classe de solutions présente une difficulté liée à la monotonie des horloges. Si, par exemple, une horloge a pris de l'avance par rapport au temps de référence, elle sera ramenée en arrière lors de la resynchronisation. Si une première donnée a été enregistrée immédiatement avant l'instant de resynchronisation et une deuxième donnée immédiatement après, la date du deuxième enregistrement est antérieure à celle du premier et l'ordre temporel des données se trouve inversé. De plus, les algorithmes connus qui imposent la conservation de la monotonie du temps présentent une convergence relativement lente.

En tout cas, baser la synchronisation des données sur la synchronisation des horloges ou sur l'utilisation d'une horloge unique pose des limites aux possibilités de reconfiguration du réseau de dispositifs. Voici un exemple concret d'un cas où les techniques connues de l'art antérieur montrent leurs limites. Considérons deux machines, X et Y, connectées à un même réseau et dont les horloges sont maintenues synchrones par une méthode matérielle ou logicielle. A un moment donné, la machine Y est coupée du réseau, volontairement ou à cause d'un problème de connexion, mais continue à enregistrer des données ; enfin la machine Y est reconnectée au bout d'un certain temps. On comprend facilement qu'il n'est pas possible d'ordonner chronologiquement les données acquises pendant la période de déconnexion, car la synchronisation entre les horloges des machines X et Y est irrémédiablement perdue. Pour cette raison, ces procédés de synchronisation sont très sensibles à d'éventuels problèmes de connexion au réseau. De plus, si pendant la période de déconnexion la machine Y avait été reliée à un deuxième réseau comprenant également une machine Z, il n'y

aurait aucun moyen de synchroniser les données enregistrées par X avec celles enregistrées par Z. La reconnexion de la machine Y est également problématique, notamment si l'on veut conserver la monotonie de son horloge. Pour cette raison, ces procédés connus de synchronisation posent  
5 des limites aux possibilités de reconfiguration « à chaud » (pendant le fonctionnement) des réseaux auxquels ils sont appliqués.

Il est également connu de l'art antérieur d'utiliser des marquages temporels pour établir une correspondance approximative entre les temps locaux de dispositifs dont les horloges internes ne sont pas  
10 synchronisées. Dans ce cas, la synchronisation des données se fait le plus souvent a posteriori, c'est à dire après la fin de la session d'enregistrement, et pour cette raison on parle parfois de « resynchronisation » des données.

Un tel cas se présente fréquemment dans le domaine du multimédia, où il est par exemple nécessaire de synchroniser des images, acquises par une caméra numérique, avec des sons, acquis par un  
15 microphone externe. Dans le domaine du multimédia les exigences en termes de précision sont cependant assez modestes, des erreurs jusqu' à environ 33 millisecondes (ms) étant indétectables par les êtres humains. Plusieurs techniques de synchronisation des données utilisées dans les applications  
20 multimédia sont décrites dans l'article de G. Blakowski et R. Steinmetz, "A media synchronization survey : reference model, specification, and case studies", IEEE J. Selected Areas Commun. 141 (1996), pages 5 – 35.

Ces techniques sont robustes et permettent une grande flexibilité, mais leur précision est très limitée et insuffisante pour de  
25 nombreuses applications. De plus, il n'est pas possible de déterminer avec certitude une limite supérieure de l'amplitude des erreurs de synchronisation commises.

Un objet de la présente invention est un procédé pour établir une correspondance entre les temps locaux de deux ou plusieurs machines  
30 dont les horloges ne sont pas synchronisées.

Un autre objet de la présente invention est un tel procédé, avec une précision améliorée par rapport à l'art antérieur.

Encore un autre objet de la présente invention est un tel procédé, avec une précision connue et modélisée par un intervalle.

Encore un autre objet de la présente invention est un tel procédé, qui soit robuste face à des problèmes de connexion du réseau  
5 auquel sont connectées les machines dont on veut mettre en correspondance les temps locaux.

Encore un autre objet de la présente invention est un tel procédé, qui permette une reconfiguration dynamique d'un tel réseau.

Encore un autre objet de la présente invention est un tel  
10 procédé, qui permette d'utiliser uniquement du matériel standard.

La présente invention a également pour objet un procédé de synchronisation des données enregistrées par deux ou plusieurs machines, ou engendrées par deux ou plusieurs dispositifs, qui ne demande pas de synchronisation des horloges desdits dispositifs ou machines, et qui se base  
15 sur l'établissement une correspondance entre les temps locaux de deux ou plusieurs machines dont les horloges ne sont pas synchronisées.

D'autres objets de la présente invention consistent à fournir un tel procédé avec une précision améliorée par rapport à l'art antérieur, avec une précision connue, qui soit robuste face à des problèmes de connexion du  
20 réseau auquel sont connectées les machines dont on veut mettre en correspondance les temps locaux, et/ou qui permette d'utiliser uniquement du matériel standard.

Au moins un des objets précités est atteint à l'aide d'un procédé pour établir une correspondance par intervalles entre le temps  
25 indiqué par une première horloge monotone et le temps indiqué par une deuxième horloge, également monotone, caractérisé en ce qu'il met en œuvre, sur au moins une plage temporelle, une première référence temporelle commune à la première et à la deuxième horloge et monotone sur ladite plage, et en ce que ledit procédé comporte les étapes suivantes :

30 a) détermination d'un premier intervalle temporel délimité par un premier couple de valeurs du temps de la première horloge et appartenant à une première plage temporelle sur laquelle existe ladite

première référence temporelle commune à la première et à la deuxième horloge ;

b) détermination d'un deuxième intervalle temporel délimité par un deuxième couple de valeurs du temps de la première horloge et appartenant à une deuxième plage temporelle sur laquelle existe ladite première référence temporelle commune à la première et à la deuxième horloge ;

c) détermination, à l'aide de la référence temporelle commune, d'un troisième intervalle temporel, délimité par un premier couple de valeurs du temps de la deuxième horloge, et contenant le premier intervalle temporel ;

d) détermination, à l'aide de la référence temporelle commune, d'un quatrième intervalle temporel, délimité par un deuxième couple de valeurs du temps de la deuxième horloge, et contenant ledit deuxième intervalle temporel ;

e) pour un cinquième intervalle temporel quelconque délimité par un troisième couple de valeurs du temps de la première horloge, calcul d'un sixième intervalle temporel, délimité par un troisième couple de valeurs du temps de la deuxième horloge et contenant ledit cinquième intervalle temporel, le calcul étant effectué par interpolation ou extrapolation à l'aide desdits premier, deuxième, troisième et quatrième intervalles.

Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, l'étape c) comporte les opérations suivantes :

c1) détermination d'un septième et d'un huitième intervalle temporel, délimités par un quatrième et cinquième couple de valeurs du temps de la deuxième horloge respectivement et appartenant à la première plage temporelle, tels que ledit premier intervalle temporel est compris entre lesdits septième et huitième intervalles temporels ;

c2) détermination d'une première, deuxième et troisième valeur de la première référence temporelle commune, comprises dans lesdits premier, septième et huitième intervalles temporels respectivement ;



c3) calcul par interpolation dudit troisième intervalle temporel, à l'aide desdits premier, septième et huitième intervalles temporels et desdites première, deuxième et troisième valeurs de la première référence temporelle commune ;

5 et l'étape d) comporte les opérations suivantes :

d1) détermination d'un neuvième et d'un dixième intervalle temporel, délimités par un sixième et septième couple de valeurs du temps de la deuxième horloge respectivement et appartenant à la deuxième plage temporelle, tels que ledit deuxième intervalle temporel est compris entre  
10 lesdits neuvième et dixième intervalles ;

d2) détermination d'une quatrième, cinquième et sixième valeur de la première référence temporelle commune, comprises dans lesdits deuxième, neuvième et dixième intervalles temporels respectivement ;

15 d3) calcul par interpolation dudit quatrième intervalle temporel, à l'aide desdits deuxième, neuvième et dixième intervalles temporels et desdites quatrième, cinquième et sixième valeurs de la première référence temporelle commune.

De préférence, l'opération c3) est effectuée en remplaçant  
20 lesdites première, deuxième et troisième valeurs de la référence temporelle commune par des intervalles temporels dont la largeur est égale à la discrétisation de la première référence temporelle commune sur la première plage temporelle, et l'opération d3) est effectuée en remplaçant lesdites  
25 quatrième, cinquième et sixième valeurs de la référence temporelle commune par des intervalles temporels dont la largeur est égale à la discrétisation de la première référence temporelle commune sur la deuxième plage temporelle.

Avantageusement, pendant la ou les plages temporelles sur lesquelles existe une première référence temporelle commune, on enregistre à plusieurs reprises une première lecture de la première horloge, suivie par  
30 une lecture de la première référence temporelle commune et ensuite par une deuxième lecture de la première horloge, et de manière indépendante on enregistre, également à plusieurs reprises, une première lecture de la

deuxième horloge, suivie par une lecture de la première référence temporelle commune et ensuite par une deuxième lecture de la deuxième horloge, et les opérations c1), c2), c3), d1), d2) et d3) sont effectuées à l'aide de ces enregistrements.

5 Dans un autre mode particulier de réalisation de l'invention l'étape c) comporte les opérations suivantes :

c1) détermination d'une septième et d'une huitième valeur du temps de la deuxième horloge appartenant à la première plage temporelle, tels que ledit premier intervalle temporel est compris entre lesdits  
10 septième et huitième valeurs;

c2) détermination d'une première, deuxième et troisième intervalle de valeurs de la première référence temporelle commune, comprenant ledit premier intervalle temporel et lesdites septième et huitième valeurs du temps de la deuxième horloge respectivement;

15 c3) calcul par interpolation dudit troisième intervalle temporel, à l'aide dudit premier intervalle de valeurs du temps de la première horloge, desdites septième et huitième valeurs du temps de la deuxième horloge et desdits premier, deuxième et troisième intervalles de valeurs de la première référence temporelle commune ;

20 et l'étape d) comporte les opérations suivantes :

d1) détermination d'une neuvième et d'une dixième valeurs du temps de la deuxième horloge appartenant à la deuxième plage temporelle, tels que ledit deuxième intervalle temporel est compris entre lesdites neuvième et dixième valeurs ;

25 d2) détermination d'un quatrième, cinquième et sixième intervalle de valeur de la première référence temporelle commune, comprenant ledit deuxième intervalle temporel et lesdites neuvième et dixième valeurs du temps de la deuxième horloge;

30 d3) calcul par interpolation dudit quatrième intervalle temporel, à l'aide dudit deuxième intervalle de valeurs du temps de la première horloge, desdites neuvième et dixième valeurs du temps de la

deuxième horloge et desdits quatrième, cinquième et sixième intervalles de valeurs de la première référence temporelle commune.

De préférence, les opérations c3) et d3) sont effectuées en remplaçant lesdites septième, huitième, neuvième et dixième valeurs du temps de la deuxième horloge par des intervalles temporels dont la largeur  
5 est égale à la discrétisation du temps de la deuxième horloge.

Avantageusement, pendant la ou les plages temporelles sur lesquelles existe une première référence temporelle commune, on enregistre à plusieurs reprises une première lecture de la  
10 première référence temporelle commune, suivie par une lecture de la première horloge et ensuite par une deuxième lecture de la première référence temporelle commune, et de manière indépendante on enregistre, également à plusieurs reprises, une première lecture de la première référence temporelle commune, suivie par une lecture de la de la deuxième horloge (et  
15 ensuite par une deuxième lecture de la première référence temporelle commune, et les opérations c1), c2), c3), d1), d2) et d3) sont effectuées à l'aide de ces enregistrements.

Dans des modes particuliers de réalisation de l'invention, les calculs par interpolation ou extrapolation mentionnés ci-dessus sont plus  
20 précisément des interpolations ou extrapolations linéaires, ou linéaires par intervalles.

Avantageusement, lorsque la première référence temporelle commune à la première et à la deuxième horloge existe sur au moins deux plages temporelles distinctes et peut comporter une rupture de monotonie  
25 d'une plage temporelle à l'autre, une deuxième référence temporelle commune monotone est utilisée afin de résoudre les ambiguïtés qui résultent de la non-monotonie de la première référence temporelle commune.

L'invention porte également sur un procédé de synchronisation des données enregistrées et datées par une première  
30 machine, ayant une première horloge, par rapport au temps local d'une deuxième machine, ayant une deuxième horloge, caractérisé en ce que la datation s'effectue en associant à chaque donnée enregistrée par la première

machine un cinquième intervalle temporel, délimité par un troisième couple de valeurs du temps de la première horloge, et en ce que la synchronisation s'effectue en déterminant, par un procédé tel que décrit ci-dessus, un sixième intervalle temporel, délimité par un troisième couple de valeurs du temps de la deuxième horloge et contenant ledit cinquième intervalle temporel.

Dans un mode particulier de réalisation d'un tel procédé de synchronisation des données, la première référence temporelle commune est fournie par l'horloge d'un bus synchrone qui relie au moins temporairement lesdites première et deuxième machine.

Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, un tel procédé de synchronisation des données se décompose en un premier sous-procédé d'enregistrement de lectures d'horloges tel que décrit plus haut, effectué localement par chaque machine dont on veut pouvoir synchroniser les données, et un deuxième procédé de synchronisation proprement dite, effectué par une seule machine vers laquelle toutes les données ont été transférées après la fin de la session d'enregistrement des données.

D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins annexés, donnés à titre d'exemple et dans lesquels :

Les figures 1A et 1B illustrent comment on peut procéder à la détermination d'une correspondance entre les temps indiqués par deux horloges distinctes et non synchronisées;

les figures 2, 3A – 3L, 4 et 5, ainsi que les tableaux Tab.A, Tab.B et Tab.C, illustrent par un exemple concret un procédé constituant un mode de réalisation de l'invention; et

la figure 6 montre un organigramme de ce procédé.

Avant de procéder à la description des dessins, il est opportun de définir précisément certains des termes et des notations utilisées dans la suite.

Par « vrai temps » on entend le temps physique, qui ne peut pas être connu précisément et dont les horloges ne donnent qu'une approximation ; dans ce document, «  $t$  » indique une valeur du vrai temps.

Par « horloge » on entend une horloge numérique, constituée par un oscillateur couplé à un compteur. A chaque cycle de l'oscillateur, le compteur est incrémenté d'une quantité discrète  $\delta$  (discrétisation). Par conséquent, le diagramme du temps mesuré par une horloge par rapport au  
 5 vrai temps a une forme en escalier, avec des marches de hauteur  $\delta$ . Le compteur d'une horloge a nécessairement une capacité finie et est remis à zéro quand un dépassement se produit. Des horloges peuvent néanmoins avoir une capacité suffisamment grande pour que ce problème soit négligé.

Un « bus synchrone » est un bus sur lequel est diffusé un  
 10 signal d'horloge.

Par « temps local » d'une machine on entend le temps mesuré par l'horloge de cette machine. Une valeur du temps local est indiquée par « T ».

Par « date » d'une donnée enregistrée par une machine on  
 15 entend soit le temps lu sur l'horloge de la machine à l'instant de l'enregistrement de la donnée, soit l'intervalle compris entre deux lectures de cette horloge, effectuées avant et après ledit enregistrement. Toute ambiguïté sera levée par le contexte et par la notation: ainsi, la date indiquée par « [T] » est en fait l'intervalle compris entre  $\underline{T}$  et  $\bar{T}$ , avec  $\underline{T} < \bar{T}$ . En réalité, toute date  
 20 peut être considérée comme un intervalle : même si on sait avec certitude quelle était la valeur indiquée par l'horloge de la machine au moment de l'enregistrement d'une donnée, il reste une indétermination  $\delta$  due à la discrétisation de ladite horloge.

Par « monotonie » on entend la propriété d'une horloge telle  
 25 que, si  $t_1 < t_2$ ,  $T(t_1) < T(t_2)$ .

Par « décalage » (offset) on entend la différence entre le temps indiqué par deux horloges à un instant donné, ou entre le temps d'une horloge et le vrai temps. Le décalage entre deux temps définis à l'aide d'intervalles est aussi un intervalle: soit  $[T_A] = [\underline{T}_A, \bar{T}_A]$  et  $[T_B] = [\underline{T}_B, \bar{T}_B]$ ,  
 30 alors le décalage permettant de passer de  $[T_B]$  à  $[T_A]$  vaut :

$$[\text{off}_{AB}] = [\underline{\text{off}}_{AB}, \overline{\text{off}}_{AB}] = [\underline{T}_A - \bar{T}_B, \bar{T}_A - \underline{T}_B] \quad (1)$$

tel que  $[T_A] = [T_B] + [\text{off}_{AB}]$ .

Par « dérive » (drift) entre deux horloges, ou une horloge et le vrai temps, on entend la dérivée du décalage par rapport au temps local d'une des horloges ou du vrai temps. Sauf indication contraire dans ce document on considère que, pour chaque couple d'horloges, la dérive est constante dans le temps et que, par conséquent, le décalage est une fonction linéaire par rapport au temps (hypothèse de dérives linéaires). Dans ce cas, la dérive peut être calculée en connaissant deux décalages déterminés à des dates différentes. Si les décalages et/ou les dates sont des intervalles, la dérive aussi en est un :

$$[\text{drift}_{AB}] = [\underline{\text{drift}_{AB}}, \overline{\text{drift}_{AB}}] = \frac{\begin{bmatrix} \text{off}_{AB}^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{off}_{AB}^1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} T_B^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_B^1 \end{bmatrix}} \quad (2)$$

au sens du calcul par intervalles.

Les exposants 1 et 2 se réfèrent à la première et à la deuxième date à la quelle un décalage est déterminé.

Par « synchronisation par intervalles des données de la machine B par rapport à la machine A » on entend la détermination, pour chaque donnée enregistrée par la machine B avec une date  $[T_B]$ , d'un intervalle  $[T_{AB}]$  du temps local de la machine A tel que  $\underline{T_{AB}}$  précède l'enregistrement de ladite donnée et  $\overline{T_{AB}}$  le suit. Dans un souci de concision on dit que  $[T_{AB}]$  est le temps local de la machine A qui « correspond » à  $[T_B]$ . On observe que le rôle des deux machines n'est pas symétrique et qu'en général l'intervalle  $[T_{AB}]$  est plus large que  $[T_B]$ .

Dans la suite, lorsque le contexte ne se prête pas à des ambiguïtés, l'expression « synchronisation par intervalles » est remplacée par « synchronisation » tout simplement.

Par « resynchronisation » on entend plus spécifiquement une synchronisation effectuée après que toutes les données aient été enregistrées.

La « précision » d'une synchronisation par intervalles est déterminée par l'élargissement de  $[T_{AB}]$  par rapport  $[T_B]$ .

La « précision » d'un procédé de synchronisation qui se propose d'établir une relation entre des valeurs ponctuelles de  $T_A$  et  $T_B$  est la différence entre la valeur calculée de  $T_{AB}$  et sa valeur « vraie ».

Les techniques de calcul par intervalles sont exposées dans l'ouvrage « Applied Interval Analysis », L. Jaulin, M. Kieffer, O. Dirit et E. Walter, Springer-Verlag, 2001, ISBN : 1-85233-219-0.

Les figures 1A et 1B illustrent comment on peut procéder à la détermination de la correspondance entre les temps  $T_A$  et  $T_B$  indiqués par deux horloges A et B. Dans un souci de simplicité, la discrétisation des horloges a été négligée ( $\delta \rightarrow 0$ ) et donc les lignes  $T_A(t)$  et  $T_B(t)$ , qui ont en réalité une forme en escalier, ont été approchées par des droites.

La première possibilité, qui vient immédiatement à l'esprit, consiste simplement à lire « simultanément » les deux horloges à un instant  $t_0$  pour trouver une correspondance entre  $T_A(t_0)$  et  $T_B(t_0)$ . En fait, cette lecture « simultanée » n'est pas possible dans le cas de machines réelles ; de plus, chaque lecture demande un temps fini, qui ne peut pas être prédéterminé et qui dépend des temps de transmission des données sur des lignes ou bus, ainsi que des latences des processeurs et des systèmes d'exploitation. Si les exigences de précision de la synchronisation sont relativement modestes, comme dans le cas des applications multimédia, l'imprécision sur le temps nécessaire à effectuer la double lecture peut être inférieure à la marge d'erreur admise. Il est donc licite d'ignorer le problème et considérer que les deux lectures sont effectuées sensiblement en même temps.

Cette hypothèse n'est pas justifiée si une précision plus élevée est requise. Comme il n'est pas possible d'établir une correspondance biunivoque  $T_A \leftrightarrow T_B$ , on est donc amené à adopter une approche « par intervalles », comme expliqué plus haut. Un avantage majeur de cette

approche par rapport à toute technique essayant de déterminer une équivalence approximative entre dates « ponctuelles » est qu'elle permet de connaître exactement l'incertitude de la synchronisation, qui est égale à la largeur de l'intervalle.

5                   Comme illustré sur la figure 1B, pour déterminer une correspondance par intervalles entre les temps locaux des machines A et B, d'abord, à un instant  $t_1$ , on lit le temps local de la machine A,  $T'_A$ , ensuite, à un instant  $t_0$ , celui de la machine B,  $T_B$ , et enfin, à un instant  $t_2$ , à nouveau celui la machine A,  $T''_A$  (il ne faut pas oublier que les valeurs exactes de  $t_0$ ,  $t_1$   
10 et  $t_2$  ne peuvent pas être connues). On comprend aisément qu'il faut vérifier qu'aucune rupture de monotonie du temps local de la machine A n'ait lieu entre la première et la dernière lecture.

Un exemple d'un procédé selon l'invention pour déterminer une correspondance entre les temps indiqués par des horloges distinctes et  
15 synchroniser ainsi des données est maintenant décrit en détail à l'aide des figures 2, 3A – 3L, 4 et 5, ainsi que des tableaux Tab.A, Tab.B et Tab.C. Pour l'instant on se limite à considérer une synchronisation « a posteriori » (resynchronisation), c'est-à-dire que les données sont synchronisées après la fin de la session de fonctionnement du système (appelée également  
20 « session d'acquisition des données » par la suite). Le cas de la synchronisation « en temps réel » (pendant la session de fonctionnement du système) sera considéré plus loin.

Un système informatique, représenté sur la figure 2, comprend trois machines, A, B et C, telles que des ordinateurs, chacune  
25 ayant une horloge interne  $H_A$ ,  $H_B$  et  $H_C$  qui mesure un temps local  $T_A(t)$ ,  $T_B(t)$  et  $T_C(t)$  respectivement, ainsi qu'un bus synchrone BUS, tel qu'un bus FireWire® (IEEE 1394) ayant une horloge propre  $H_{BUS}$  présentant une précision meilleure que  $3\mu s$  dans le cas le plus défavorable selon la norme IEEE1394a.

30                   Les machines peuvent se connecter et se déconnecter du bus BUS indépendamment les unes des autres ; à chaque fois qu'une reconfiguration du système se produit (par exemple, à chaque fois qu'une



machine se connecte ou se déconnecte), un signal d'interruption est transmis sur le bus. Une des machines connectées au réseau est nommée « machine de référence » est son nom est connu par les autres machines ; dans la figure il s'agit de la machine B, caractérisé par un contour en trait épais. La machine de référence ne peut pas être considérée comme une machine « maître » dans un système centralisé : n'importe quelle machine du réseau peut être choisie pour assumer temporairement cette fonction. En effet, une nouvelle machine de référence est choisie de manière aléatoire à chaque interruption, ce qui permet d'assurer le fonctionnement du système même en cas de déconnexion de l'ancienne machine de référence.

Chaque machine est également équipée d'une interface de bus  $I_A$ ,  $I_B$  et  $I_C$ , comportant une horloge,  $HI_A$ ,  $HI_B$  et  $HI_C$  respectivement, pilotée par  $H_{BUS}$ . L'horloge du bus  $H_{BUS}$  est produite par l'une des interfaces  $I$  (appelée « Cycle Master » dans la norme IEEE FireWire). Les horloges  $HI$  sont asservies sur  $H_{BUS}$ .

L'horloge du bus  $H_{BUS}$  a un compteur de capacité limitée, qui est remis à zéro toutes les 128 s, mais les horloges des interfaces comportent une extension logicielle ayant une capacité suffisamment grande pour que des dépassements ne se produisent pas pendant la durée de fonctionnement du système. Le temps mesuré par l'horloge de l'interface  $HI_A$ ,  $HI_B$  et  $HI_C$  (« temps d'interface ») de la machine A, B et C est indiqué par  $NT_A(t)$ ,  $NT_B(t)$  et  $NT_C(t)$  respectivement.

Une des machines est choisie pour « donner le temps du réseau » : cela signifie que les horloges d'interface de toutes les autres machines sont synchronisées sur la sienne. A chaque interruption, une nouvelle machine est choisie pour cette tâche et l'extension logicielle des horloges d'interface est remise à zéro : après l'interruption, toutes les horloges indiquent donc le même temps que l'horloge du bus  $H_{BUS}$ .

Il faut noter que la machine qui donne le temps du réseau n'est pas nécessairement la machine de référence. Si une machine est déconnectée du réseau, elle est sa propre machine de référence et son temps du réseau est le temps de sa propre horloge d'interface.

On comprend que le temps NT du réseau constitue une première référence temporelle commune à toutes les machines reliées au bus BUS, mais non monotone. Le temps de la machine de référence constitue une deuxième référence temporelle commune à toutes les machines reliées  
5 au bus BUS et, en plus, monotone. Cette deuxième référence temporelle est néanmoins très imprécise car, pour la connaître, une machine autre que celle de référence doit effectuer une requête par l'intermédiaire du bus, ce qui demande un temps relativement important et non déterminable a priori.

Tout au long de son fonctionnement, chaque machine  
10 enregistre, indépendamment des autres, des données et leur date sous forme d'intervalle, par exemple des acquisitions de capteurs.

En même temps, chaque machine construit un fichier dit « horodateur », qui est constitué par une suite de lignes. Les lignes sont remplies à intervalles approximativement réguliers, par exemple d'une  
15 seconde environ, et elles comprennent cinq champs :

TL1 est une première lecture du temps local de la machine ;  
TR est une lecture du temps du réseau ;  
TL2 est une deuxième lecture du temps local de la machine ;  
NMR est le nom de la machine de référence ; et  
20 TMR est le temps local de la machine de référence.

Les trois premières lectures doivent être effectuées dans l'ordre, de telle sorte que TR soit compris entre TL1 et TL2.

Quand un signal d'interruption est reçu, la machine remplit une « ligne d'exception » en attribuant aux champs TL1, TR, TL2 et TMR la  
25 valeur 0 et au champ NMR le nom conventionnel « BUS\_RESET ».

Le remplissage des fichiers horodateurs est un processus de basse priorité et peu onéreux, qui n'interfère pas sensiblement avec l'enregistrement et la datation des événements.

Une fois la session terminée, les fichiers horodateurs sont  
30 transférés à un même ordinateur et une sous-procédure de resynchronisation proprement dite peut être démarrée.

On se pose, par exemple, le problème spécifique de resynchroniser les données enregistrées par les machines A et B.

Les tableaux Tab.A, Tab.B et Tab.C montrent une partie du contenu des fichiers horodateurs des machines A, B et C respectivement, appelés par la suite FHA, FHB et FHC respectivement. Seulement les deux lignes qui précèdent et suivent chaque interruption sont représentées ; de plus, dans un souci de clarté et de gain de place, le champ TL2 ne contient pas la valeur de la deuxième lecture du temps local de la machine, mais la différence entre la deuxième et la première lecture, ce qui est clairement équivalent. Les temps indiqués sont en microsecondes ( $\mu$ s), mais cela n'est pas essentiel à la compréhension du procédé.

Les interruptions subdivisent chaque fichier en sections  $\alpha 1 - \alpha 8$ ,  $\beta 1 - \beta 9$  et  $\gamma 1 - \gamma 9$ , séparées par des lignes d'exception. Il est important d'observer qu'il y a une interruption à chaque rupture de monotonie, donc on peut considérer que le temps du réseau est en fait « localement » monotone sur chaque section.

Les champs NMR et TMR permettent de déterminer une correspondance temporelle entre les sections des différents fichiers. Par exemple, on voit que les sections  $\alpha 1$  et  $\gamma 2$  ont été enregistrées simultanément, pendant que les machines A et C étaient toutes deux reliées au bus BUS, avec la machine A comme machine de référence. De cette façon on peut reconstituer l'« histoire » du système, comme illustré sur les figures 3A – 3L.

Initialement (fig. 3A) seulement la machine C est en fonction et elle remplit la section  $\gamma 1$  de son fichier horodateur.

Ensuite, (fig. 3B), la machine A se met en fonction et les deux machines se connectent au bus pendant un certain temps (sections  $\alpha 1$  et  $\gamma 2$ ), A étant la machine de référence.

Puis, figure 3C, elles se séparent à nouveau (sections  $\alpha 2$  et  $\gamma 3$ ).

Pendant ce temps (fig. 3D) la machine B se met en fonction, mais reste déconnectée du réseau (section  $\beta 1$ ), donc ne produit pas d'interruption.

Pendant la cinquième période (figure 3E, sections  $\alpha 2$ ,  $\beta 2$  et  $\gamma 4$ ) les machines B et C sont connectées au bus, et C est la machine de référence. La machine A ne reçoit pas le signal d'interruption provoqué par la connexion de la machine B, donc elle continue à remplir la section  $\alpha 2$  de son fichier horodateur.

Lors de la sixième période, figure 3F, les trois machines sont déconnectées du bus et remplissent les sections  $\alpha 2$ ,  $\beta 3$  et  $\gamma 5$  des fichiers horodateurs respectifs (la machine A, qui était déjà déconnectée ne reçoit pas le signal d'interruption provoqué par la déconnexion de B et C).

Figure 3G, les machines A et B se branchent à nouveau sur le bus, avec A comme machine de référence, et passent ainsi aux sections  $\alpha 3$  et  $\beta 4$ , alors que la machine C reste déconnectée et, ne recevant pas de signal d'interruption, continue à remplir la section  $\gamma 5$ .

Ensuite, figure 3H, les trois machines se retrouvent connectées au bus (sections  $\alpha 4$ ,  $\beta 5$  et  $\gamma 6$ ), avec B comme machine de référence.

Quand cette dernière (B) se déconnecte (figure 3I, sections  $\alpha 5$ ,  $\beta 6$  et  $\gamma 7$ ), A devient la machine de référence. Peu après (figure 4J, sections  $\alpha 6$ ,  $\beta 7$  et  $\gamma 8$ ) B se reconnecte et redevient machine de référence.

Figure 3K, la machine C se déconnecte (sections  $\alpha 7$ ,  $\beta 8$  et  $\gamma 9$ ) et A redevient machine de référence.

Enfin (figure 3L, sections  $\alpha 8$  et  $\beta 9$ ) les machines A et B se déconnectent aussi, après quoi on ne s'intéresse plus à l'évolution du système.

On a ainsi réalisé, grâce à la deuxième référence temporelle (TMR) une sorte de resynchronisation, qui est cependant très grossière car les lignes des fichiers horodateurs sont remplies à basse cadence. Cette mise en correspondance des sections  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  permet de pallier la non-monotonie

de la première référence temporelle (NT) et de s'en servir pour effectuer la resynchronisation par intervalles proprement dite.

Dans cet exemple on a considéré le cas où un seul bus est présent.

5 En revenant au problème de resynchroniser les données de la machine B par rapport au temps de la machine A, il faut d'abord déterminer les « plages temporelles communes », c'est-à-dire les périodes pendant lesquelles ces deux machines se sont retrouvées connectées au même réseau par le bus BUS, qui est celui du seul réseau considéré dans l'exemple.

10 Il y a quatre de ces plages : P1, qui correspond aux sections  $\alpha_3$  et  $\beta_4$  ; P2, qui correspond aux sections  $\alpha_4$  et  $\beta_5$  ; P3, qui correspond aux sections  $\alpha_6$  et  $\beta_7$  et P4, qui correspond aux sections  $\alpha_7$  et  $\beta_8$ . Les plages P1 et P2, ainsi que P3 et P4, sont limitrophes, mais séparées par une interruption.

La figure 4 est une représentation graphique de l'information

15 contenue dans les fichiers FHA et FHB (la discrétisation des horloges est négligée : on ne distingue pas les marches correspondant aux incréments discrets des compteurs). L'axe des ordonnées porte les temps locaux des machines A et de B et les temps des réseaux auxquels lesdites machines sont connectées, celui des abscisses le vrai temps. Les lignes TMA et TMB

20 représentent respectivement les temps locaux de A et de B. Les lignes TRA (pointillée) et TRB (cercles) représentent les temps du réseau de A et de B respectivement. Les plages communes P1, P2, P3 et P4 sont mises en évidence par des zones ombrées.

Comme il a été expliqué plus haut, chaque donnée

25 enregistrée par la machine B est caractérisée par une date  $[T_B]$ , qui est un intervalle compris entre deux lectures de l'horloge  $H_B$  entourant une valeur du temps du réseau,  $[NT]$ . On se pose comme objectif de déterminer  $[T_{AB}]$ , l'intervalle du temps local de la machine A correspondant à  $[T_B]$ .

On considère d'abord le cas où  $[T_B]=[T_B^1]$ , situé à l'intérieur

30 d'une plage temporelle commune, par exemple P1, comme illustré sur la figure 4. La première opération consiste à déterminer deux dates  $[T_{A1}^1]$  et

[T<sub>A2</sub><sup>1</sup>] de la machine A appartenant à la même plage et situées avant et après [T<sub>B</sub><sup>1</sup>]. En fait, ces « dates » sont des intervalles déterminés par la méthode décrite en référence à la figure 1B et correspondants aux temps du réseau [NT<sub>A1</sub><sup>1</sup>] et [NT<sub>A2</sub><sup>1</sup>] respectivement. L'hypothèse de dérive linéaire des horloges

5 permet de calculer [T<sub>AB</sub><sup>1</sup>] par une interpolation linéaire :

$$\left[ T_{AB}^1 \right] = \left[ T_{A1}^1 \right] + \frac{\left[ NT_B^1 \right] - \left[ NT_{A1}^1 \right]}{\left[ NT_{A2}^1 \right] - \left[ NT_{A1}^1 \right]} \left( \left[ T_{A2}^1 \right] - \left[ T_{A1}^1 \right] \right) \quad (3)$$

Comme toutes les dates sont des intervalles, le résultat est

10 aussi un intervalle. Il est clair que l'équation (3) ne pourrait pas être utilisée si entre [NT<sub>A1</sub><sup>1</sup>] et [NT<sub>A2</sub><sup>1</sup>] s'était produite une interruption, et donc une rupture de monotonie du temps du réseau. Pour cette raison, il a été requis que [T<sub>A1</sub><sup>1</sup>] et [T<sub>A2</sub><sup>1</sup>] appartiennent à la même plage temporelle.

Le décalage (offset) entre les horloges des machines A et B à

15 la date [T<sub>B</sub>] est simplement donné par :

$$[off_{AB}^1] = [T_{AB}^1] - [T_B^1] \quad (4)$$

S'agissant de la différence entre deux intervalles, le décalage est aussi un intervalle.

En connaissant le décalage entre les horloges à deux dates

20 différentes, [T<sub>B</sub><sup>1</sup>] et [T<sub>B</sub><sup>2</sup>], il est possible de déterminer la dérive (drift), supposée linéaire :

$$\left[ drift_{AB} \right] = \frac{\left[ off_{AB}^2 \right] - \left[ off_{AB}^1 \right]}{\left[ T_B^2 \right] - \left[ T_B^1 \right]} \quad (5)$$

où [off<sup>1</sup>] et [off<sup>2</sup>] sont les valeurs du décalage entre les horloges H<sub>A</sub> et de H<sub>B</sub> aux dates [T<sub>B</sub><sup>1</sup>] et [T<sub>B</sub><sup>2</sup>] respectivement.

25 Il est important d'observer que la présence d'interruptions entre [T<sub>B</sub><sup>1</sup>] et [T<sub>B</sub><sup>2</sup>] ne constitue pas un obstacle à l'application de l'équation (5), car le temps du réseau ne figure pas directement dans cette dernière. Au

contraire, l'homme du métier comprendra facilement qu'il est avantageux de maximiser l'écart entre les dates  $[T_B^1]$  et  $[T_B^2]$  : par conséquent on prend pour  $[T_B^1]$  la première date de la plage P1 et pour  $[T_B^2]$  la dernière de la plage P4.

- A ce point on dispose de toute l'information nécessaire pour
- 5 calculer la correspondance entre des dates lues sur les horloges  $H_A$  et  $H_B$ , même à l'extérieur des plages communes P1 – P4. On peut en effet démontrer que :

$$\text{Si } [T_B] \subset [\underline{T_B^1}, \overline{T_B^2}], \quad \text{alors :}$$

$$[T_{AB}] = [\underline{T_{AB}}, \overline{T_{AB}}] \quad (6)$$

10 avec :

$$\underline{T_{AB}} = \underline{T_{AB}^1} + \frac{\underline{T_B} - \underline{T_B^1}}{\overline{T_B^2} - \underline{T_B^1}} (\overline{T_{AB}^2} - \underline{T_{AB}^1}) \quad (6.1)$$

et

$$\overline{T_{AB}} = \overline{T_{AB}^1} + \frac{\overline{T_B} - \overline{T_B^1}}{\underline{T_B^2} - \overline{T_B^1}} (\underline{T_{AB}^2} - \overline{T_{AB}^1}) \quad ; \quad (6.2)$$

si  $[T_B] \leq [T_B^1]$ , alors :

$$15 \quad [T_{AB}] = [T_B] + [T_B^1] + ([T_B] - [T_B^1]) \cdot [drift_{AB}] ; \text{ et} \quad (7)$$

si  $[T_B] \geq [T_B^2]$ , alors :

$$[T_{AB}] = [T_B] + [T_B^2] + ([T_B] - [T_B^2]) \cdot [drift_{AB}]. \quad (8)$$

$[T_B] \leq [T_B^1]$  est une notation simplifiée pour  $\overline{T_B} \leq \underline{T_B^1}$  et  $[T_B] \geq [T_B^2]$  pour  $\underline{T_B} \geq \overline{T_B^2}$ .

- 20 La figure 5 constitue une représentation graphique des équations 6 – 8. On observe que la largeur de l'intervalle  $[T_{AB}]$ , et donc l'imprécision de la synchronisation, est à peu près constante pour
- $[T_B] \subset [\underline{T_B^1}, \overline{T_B^2}]$  et augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette plage (intervalles  $[T_B']$ ,  $[T_{AB}']$  et  $[T_B'']$ ,  $[T_{AB}'']$ , situés respectivement
- 25 avant  $[T_B^1]$  et après  $[T_B^2]$ ). On comprend donc pourquoi il est avantageux de choisir les intervalles  $[T_B^1]$  et  $[T_B^2]$  les plus éloignés possibles. Sur les axes  $T_A$

et  $T_B$  de la figure 5, les temps connus ( $\underline{T'_B}, \overline{T'_B}, \underline{T^1_B}, \overline{T^1_B}, \underline{T^2_B}, \overline{T^2_B}, \underline{T''_B}, \overline{T''_B}, \underline{T^1_{AB}}, \overline{T^1_{AB}}, \underline{T^2_{AB}}, \overline{T^2_{AB}}$ ) sont indiqués par un rond plein et les temps inconnus ( $\underline{T'_{AB}}, \overline{T'_{AB}}, \underline{T_{AB}}, \overline{T_{AB}}, \underline{T''_{AB}}, \overline{T''_{AB}}$ ) par un rond en pointillé.

5 Il est intéressant d'observer que le fichier FHC, après avoir contribué à la mise en correspondance des sections  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ , n'est plus utilisé pour la resynchronisation.

On peut maintenant revenir à l'exemple, considéré plus haut, d'une reconfiguration « à chaud » d'un réseau, incompatible avec les  
 10 procédés de synchronisation des données connus de l'art antérieur. Tout d'abord, on observe que la reconnexion d'une machine Y au réseau comprenant une machine X ne pose aucun problème de monotonie, car les horloges des machines ne sont jamais synchronisées entre elles. De plus, comme aussi bien la machine X que la machine Z ont été reliées au même  
 15 réseau que la machine Y pendant une partie de leur histoire, toutes les données enregistrées par ces machines peuvent être resynchronisées avec celles de Y par un procédé selon l'invention. On peut donc obtenir indirectement une synchronisation des données de la machine X avec celles de la machine Y, bien qu'avec une moindre précision.

20 Sur la figure 6 est illustré un organigramme du procédé de resynchronisation par intervalles des données de la machine B par rapport à la machine A décrit ci-dessus. Le procédé peut être reproduit pour la synchronisation de plusieurs machines.

La première étape (E1) comporte le remplissage des fichiers  
 25 horodateurs FHA et FHB des machines A et B, ainsi que de ceux de toutes les autres machines du système (C, en particulier) et, en parallèle, l'enregistrement des données datées localement. Ces opérations sont exécutées jusqu'à la fin de la session d'enregistrement des données.

La deuxième étape (E2) comporte la détermination, à l'aide  
 30 des champs NMR et TMR des fichiers FHA, FHB et FHC des relations temporelles entre les différentes sections de ces fichiers, ainsi que des



« plages temporelles communes » des machines A et B, c'est-à-dire des périodes pendant lesquelles ces deux machines étaient reliées à un même réseau.

Ensuite, étape E3, on choisit deux lignes LB1 et LB2 du  
 5 fichier FHB, appartenant chacune à une « plage temporelle commune ». Il n'est pas nécessaire, que ces deux lignes appartiennent à la même plage : comme discuté précédemment, il est préférable que l'écart entre ces deux lignes soit le plus grand possible. Les deux lectures du temps local de la machine B (TL1, TL2) contenues dans les lignes LB1 et LB2 définissent les  
 10 intervalles  $[TB^1]$  et  $[TB^2]$ .

A l'étape E4 on détermine deux lignes (LA1 et LA2) du fichier FHA appartenant à la même plage temporelle que la ligne LB1 de FHB et enregistrées respectivement avant et après cette dernière. De la même manière on détermine les lignes LA3 et LA4 qui « entourent » LB2.

15 Plus synthétiquement :

$$[T_{A1}^1] \leq [T_B^1] \leq [T_{A2}^1] ;$$

$$[T_{A1}^2] \leq [T_B^2] \leq [T_{A2}^2]$$

Il est avantageux que LA1 et LA3 soient les dernières lignes enregistrées avant LB1 et LB2, et que LA2 et LA2 soient les premières lignes  
 20 enregistrées après LB1 et LB2 respectivement.

Les temps du réseau  $[NT_{A1}^1]$ ,  $[NT_{A2}^1]$ ,  $[NT_{A1}^2]$  et  $[NT_{A2}^2]$  sont définis comme correspondant au champ TR des lignes LA1 – LA4 respectivement :

$$[NT_{A1}^1] = \text{TR ligne LA1}$$

$$[NT_{A2}^1] = \text{TR ligne LA2}$$

$$[NT_{A1}^2] = \text{TR ligne LA3}$$

$$[NT_{A2}^2] = \text{TR ligne LA4}$$

La largeur de ces intervalles est donnée par la discrétisation  $\delta$  du temps du réseau.

30 A l'étape E5 on calcule  $[T_{AB}^1]$ ,  $[T_{AB}^2]$ ,  $[off_{AB}^1]$ ,  $[off_{AB}^2]$  et  $[drift_{AB}]$  par interpolation, à l'aide des équations 3 – 5.

Enfin, à l'étape E6 on effectue la resynchronisation de toutes les données de la machine B (ou seulement d'une partie d'entre elles) par interpolation ou extrapolation, à l'aide des équations 6.1, 6.2, 7 et 8.

Un procédé de resynchronisation des données selon  
5 l'organigramme de la figure 6 a été testé expérimentalement par les inventeurs.

Lors d'une première expérience ont été utilisés deux ordinateurs basés sur un processeur INTEL® Pentium IV® avec une cadence d'horloge de 1,8 et 2 GHz respectivement et une mémoire vive de 512 Mo, équipés du système d'exploitation Microsoft® Windows 2000 Professional® et  
10 d'une interface FireWire® MindReady® avec l'API Sednet 2®, reliés entre eux et à une caméra numérique UNIBRAIN® Fire-I® par un bus de réseau FireWire®. Les ordinateurs devaient enregistrer et dater les images transmises par la caméra sur le bus de réseau ; la synchronisation était  
15 considérée obtenue si les dates des images enregistrées par les deux ordinateurs étaient constituées par des intervalles se recouvrant. La largeur des intervalles de resynchronisation ainsi obtenus ( $[T_{AB}]$ , en reprenant la notation de l'exemple) a été de 250 – 300  $\mu$ s.

Une deuxième expérience a été réalisée en suivant le même  
20 protocole, mais utilisant deux ordinateurs basés sur un processeur INTEL® Pentium III® avec une cadence d'horloge de 800 MHz et une mémoire vive de 128 et 256 Mo respectivement, équipés du système d'exploitation Linux RTAI® et d'une interface FireWire® OHCI®, reliés entre eux et à une caméra numérique UNIBRAIN® Fire-I® par un bus de réseau FireWire®. Dans ce cas,  
25 des intervalles de resynchronisation de 30 – 50  $\mu$ s ont été obtenus, grâce au fait que Linux RTAI® s'exécute avec un sous-noyau en temps réel, qui permet d'atteindre une discrétisation du temps de réseau de l'ordre de 5  $\mu$ s, contre 130  $\mu$ s avec l'utilisation de l'API Sednet 2® dans le cas de Microsoft® Windows 2000 Professional®.

30 La description fait en référence aux figures 3A – 6 et aux tableaux Tab.A, Tab.B et Tab.C porte sur un mode de réalisation où les fichiers horodateurs sont remplis en enregistrant deux lectures de l'horloge de

chaque machine et une lecture du temps de réseau comprise entre les deux. Il est également possible, dans le cadre de l'invention, d'effectuer deux lectures du temps de réseau et une lecture du temps local de chaque machine, comprise entre les deux : l'algorithme de la figure 6 s'applique mutatis mutandis.

De nombreuses autres variantes et améliorations du procédé sont possibles, sans sortir du cadre de la présente invention.

Par exemple, la détermination d'un décalage  $[off_{AB}^1]$  (équation 4) demande l'utilisation d'un couple de lectures du temps du réseau,  $[NT_{A1}^1]$  et  $[NT_{A2}^1]$ . En fait, n'importe quel couple entourant  $[T_B]$  peut être choisi, et le résultat est toujours un intervalle  $[off_{AB}^1]$  contenant avec certitude la « vraie » valeur  $off_{AB}^1_{vrai}$  du décalage (impossible à connaître). Si, à partir d'une pluralité de tels couples, on détermine une pluralité d'intervalles  $[off_{AB}^1]'$ ,  $[off_{AB}^1]''$ , etc., on sait avec certitude que  $off_{AB}^1_{vrai} \in [off_{AB}^1]' \cap [off_{AB}^1]'' \cap \dots$ . On obtient de telle sorte un intervalle plus étroit, donc une précision améliorée. On peut réduire de la même façon la largeur des intervalles qui représentent la dérive et les différentes dates  $T_{AB}$ . Les principes de cette méthode, dite de « propagation de contraintes sur les intervalles » sont exposés dans l'article de L. Jaulin, M. Kieffer, O. Dirit et E. Walter cité plus haut. En effet, la méthode de propagation des contraintes a permis d'obtenir une réduction la largeur d'intervalle de l'ordre de 20% - 40% pour le décalage ( $[off_{AB}]$ ), et de l'ordre de 20% pour la dérive ( $[drift_{AB}]$ ).

Une autre amélioration consiste à relâcher l'hypothèse de dérives linéaires, qui peut être remplacée par une hypothèse de linéarité par intervalles sans modifications notables de l'algorithme.

Encore une autre variante consiste à effectuer la synchronisation des données pendant la session de fonctionnement du réseau : à intervalles réguliers, la synchronisation est effectuée en utilisant les informations disponibles, tout en continuant à acquérir des données et à ajouter des lignes aux fichiers horodateurs des différentes machines. Après chaque étape de synchronisation, on effectue l'intersection des intervalles ainsi obtenus avec ceux déterminés en précédence.

Dans le présent document on a toujours considéré que chaque machine attribue une date à des données et les enregistre localement. Il est cependant entendu que le cas dans lequel les données sont datées localement par une première machine et ensuite transmises sur le  
5 réseau pour être enregistrées par une deuxième machine fait également partie du cadre de l'invention.

Bien que, dans l'exemple considéré plus haut, on ait choisi de synchroniser les données de deux machines (A et B) par rapport au temps local d'une d'entre elles (A), on aurait pu également synchroniser ces  
10 données par rapport à une autre référence temporelle monotone, telle que le temps local de la machine C.

Tab.A

		TL1	TR	TL2	NMR	TMR
5		7847371499 7848387044	0002053250 0003069125	0000000033 0000000029	A A	7847371792 7848387342
10	$\alpha 1$	7860580135 7861589993 0	0015265875 0016276000 0	0000000012 0000000035 0	A A BUS_RESET	7860580402 7861590339 0
15	$\alpha 2$	7863621113 7864636709 7908307691 7909323310 0	0001457250 0002473125 0046157250 0047173250 0	0000000030 0000000030 0000000028 0000000029 0	A A A A BUS_RESET	7863621392 7864636991 7908308006 7909323615 0
20		7911354504 7912370110	0001500125 0002516000	0000000029 0000000028	A A	7911354787 7912370388
25	$\alpha 3$	7922526148 7923541829 0	0012675125 0013691125 0	0000000033 0000000025 0	A A BUS_RESET	7922526444 7923542076 0
30	$\alpha 4$	7925572961 7926588585 7937760209 7938775811 0	0001587625 0002603375 0013776000 0014791625 0	0000000029 0000000028 0000000029 0000000029 0	B B B B BUS_RESET	8070483980 8071499635 8082671426 8083687070 0
35		7940807022 7941822622	0001060125 0002075750	0000000016 0000000013	A A	7940807282 7941822884
40	$\alpha 5$	7947916246 7948931871 0	0008170000 0009185625 0	0000000013 0000000029 0	A A BUS_RESET	7947916494 7948932165 0
45	$\alpha 6$	7950963061 7951978665 7957056687 7958072288 0	0001708500 0002724500 0007804000 0008819875 0	0000000029 0000000026 0000000030 0000000026 0	B B B B BUS_RESET	8095874551 8096890166 8101968339 8102983900 0
50	$\alpha 7$	7960103503 7961119119 7966197126 7967212732 0	0001121000 0002136875 0007216500 0008232375 0	0000000028 0000000024 0000000028 0000000028 0	A A A A BUS_RESET	7960103794 7961119386 7966197419 7967213023 0
55		7969243956 7970259542	0001133375 0002149250	0000000029 0000000030	A A	7969244557 7970259820
60	$\alpha 8$	8006821287 8007836894 0	0038722000 0039738000 0	0000000028 0000000029 0	A A BUS_RESET	8006821557 8007837177 0

Tab.B

		TL1	TR	TL2	NMR	TMR
5		8022330108	0002126375	0000000066	B	8022331080
		8023345715	0003142125	0000000042	B	8023346654
		...				
10	B1	8030533201	0010330625	0000000037	B	8030534217
		8031564504	0011362125	0000000048	B	8031565573
		0	0	0	BUS_RESET	0
15		8033642626	0001864375	0000000048	C	0301503876
		8034673830	0002895625	0000000025	C	0302534856
		...				
	B2	8049111328	0017335250	0000000028	C	0316972351
		8050142610	0018366750	0000000038	C	0318003740
20		0	0	0	BUS_RESET	0
		8052220716	0001644125	0000000042	B	8052221861
	B3	8053251969	0002675500	0000000052	B	8053253220
		8054283215	0003706875	0000000038	B	8054284434
25		0	0	0	BUS_RESET	0
		8056377004	0001603625	0000000040	A	7911467875
		8057423861	0002650750	0000000076	A	7912514861
		...				
	B4	8066845695	0012073875	0000000028	A	7921936130
30		8067892623	0013121000	0000000079	A	7922983134
		0	0	0	BUS_RESET	0
35		8069986326	0001090375	0000000023	B	8069987185
		8071017587	0002121750	0000000044	B	8071018683
		...				
	B5	8083392603	0014497625	0000000033	B	8083393725
		8084423819	0015528875	0000000027	B	8084424600
40		0	0	0	BUS_RESET	0
		8086501954	0001835750	0000000035	B	8086502686
		8087533237	0002867125	0000000088	B	8087534237
		...				
	B6	8092689512	0008024125	0000000056	B	8092690667
45		8093720757	0009055625	0000000076	B	8093721770
		0	0	0	BUS_RESET	0
50		8095798825	0001624750	0000000031	B	8095799819
		8096830098	0002656125	0000000045	B	8096831121
		...				
	B7	8101986351	0007813125	0000000021	B	8101987503
		8103017580	0008844500	0000000037	B	8103018294
55		0	0	0	BUS_RESET	0
		8105111335	0001208875	0000000026	A	7960200939
		8106158227	0002256000	0000000027	A	7961247922
		...				
	B8	8111392602	0007491125	0000000032	A	7966482229
		8112439473	0008538125	0000000043	A	7967529242
60		0	0	0	BUS_RESET	0
		8114533236	0001501875	0000000056	B	8114534120
		8115564503	0002533375	0000000033	B	8115565530
		...				
	B9	8126908239	0013878750	0000000078	B	8126909116
65		8127939466	0014910125	0000000029	B	8127940507
		0	0	0	BUS_RESET	0

Tab.C

	TL1	TR	TL2	NMR	TMR
5	0245148935	0001123529	0000000016	C	0245149153
	0246149331	0002124009	0000000014	C	0246149485
	...				
10	0256150754	0012126272	0000000015	C	0256150859
	0257150892	0013126494	0000000015	C	0257150996
	0	0	0	BUS_RESET	0
15	0259151823	0001063357	0000000015	A	7846381976
	0260152246	0002063865	0000000015	A	7847382391
	...				
	0273269802	0015182521	0000000014	A	7860499923
	0274272003	0016184806	0000000015	A	7861502121
	0	0	0	BUS_RESET	0
20	0276282222	0001348304	0000000015	C	0276282326
	0277282343	0002348510	0000000015	C	0277282446
	...				
	0298284888	0023352815	0000000015	C	0298284991
25	0299284994	0024353005	0000000015	C	0299285096
	0	0	0	BUS_RESET	0
30	0301285283	0001656149	0000000015	C	0301285386
	0302285388	0002656338	0000000015	C	0302285493
	...				
	0317286883	0017659090	0000000014	C	0317286987
	0318286979	0018659270	0000000015	C	0318287084
	0	0	0	BUS_RESET	0
35	0320287256	0001859382	0000000015	C	0320287363
	0321287352	0002859562	0000000015	C	0321287454
	...				
	0335288551	0016861934	0000000014	C	0335288653
	0336288634	0017862101	0000000015	C	0336288737
	0	0	0	BUS_RESET	0
40	0338293102	0001537616	0000000015	B	8070433663
	0339303052	0002547650	0000000015	B	8071443653
	...				
	0351413246	0014658859	0000000015	B	8083554023
45	0352423266	0015668964	0000000015	B	8084564099
	0	0	0	BUS_RESET	0
50	0354433721	0001916670	0000000015	A	7941663622
	0355447719	0002930752	0000000014	A	7942677620
	...				
	0360493391	0007976846	0000000014	A	7947723296
	0361503412	0008986952	0000000014	A	7948733336
	0	0	0	BUS_RESET	0
55	0363515461	0001490559	0000000014	B	8095656411
	0364523458	0002498640	0000000014	B	8096664477
	...				
	0370583555	0008559245	0000000014	B	8102724637
	0371593569	0009569344	0000000015	B	8103734677
60	0	0	0	BUS_RESET	0
65	0373603746	0001851003	0000000015	C	0373603849
	0374603801	0002851142	0000000015	C	0374603904
	...				
	0394604775	0022853791	0000000015	C	0394604877
	0395604811	0023853910	0000000015	C	0395604914
	0	0	0	BUS_RESET	0

## REVENDICATIONS

1. Procédé pour établir une correspondance par intervalles ( $[T_B]$ ,  $[T_{AB}]$ ) entre le temps ( $T_B$ ) indiqué par une première horloge ( $H_B$ ) monotone et le temps ( $T_A$ ) indiqué par une deuxième horloge ( $H_A$ ), également monotone, caractérisé en ce qu'il met en œuvre, sur au moins une plage temporelle ( $P1$ ,  $P4$ ), une première référence temporelle (NT) commune à la première et à la deuxième horloge et monotone sur ladite plage, et en ce que ledit procédé comporte les étapes suivantes :
- 10 a) détermination d'un premier intervalle temporel ( $[T_B^1]$ ) délimité par un premier couple de valeurs du temps ( $T_B$ ) de la première horloge ( $H_B$ ) et appartenant à une première plage temporelle ( $P1$ ) sur laquelle existe ladite première référence temporelle (NT) commune à la première et à la deuxième horloge ;
- 15 b) détermination d'un deuxième intervalle temporel ( $[T_B^2]$ ) délimité par un deuxième couple de valeurs du temps ( $T_B$ ) de la première horloge ( $H_B$ ) et appartenant à une deuxième plage temporelle ( $P4$ ) sur laquelle existe ladite première référence temporelle (NT) commune à la première et à la deuxième horloge ;
- 20 c) détermination, à l'aide de la référence temporelle commune (NT), d'un troisième intervalle temporel ( $[T_{AB}^1]$ ), délimité par un premier couple de valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ), et contenant le premier intervalle temporel ( $[T_B^1]$ ) ;
- d) détermination, à l'aide de la référence temporelle commune (NT), d'un quatrième intervalle temporel ( $[T_{AB}^2]$ ), délimité par un deuxième couple de valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ), et contenant ledit deuxième intervalle temporel ( $[T_B^2]$ ) ;
- 25 e) pour un cinquième intervalle temporel ( $[T_B]$ ) quelconque délimité par un troisième couple de valeurs du temps ( $T_B$ ) de la première horloge ( $H_B$ ), calcul d'un sixième intervalle temporel ( $[T_{AB}]$ ), délimité par un troisième couple de valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) et contenant ledit cinquième intervalle temporel ( $[T_B]$ ), le calcul étant effectué
- 30



par interpolation ou extrapolation à l'aide desdits premier ( $[T_B^1]$ ), deuxième ( $[T_B^2]$ ), troisième ( $[T_{AB}^1]$ ) et quatrième ( $[T_{AB}^2]$ ) intervalles.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'étape c) comporte les opérations suivantes :

5                   c1) détermination d'un septième ( $[T_{A1}^1]$ ) et d'un huitième ( $[T_{A2}^1]$ ) intervalle temporel, délimités par un quatrième et cinquième couple de valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) respectivement et appartenant à la première plage temporelle (P1), tels que ledit premier intervalle temporel ( $[T_B^1]$ ) est compris entre lesdits septième ( $[T_{A1}^1]$ ) et  
10 huitième ( $[T_{A2}^1]$ ) intervalles temporels;

                  c2) détermination d'une première ( $NT_B^1$ ), deuxième ( $NT_{A1}^1$ ) et troisième ( $NT_{A2}^1$ ) valeur de la première référence temporelle commune (NT), comprises dans lesdits premier ( $[T_B^1]$ ), septième ( $[T_{A1}^1]$ ) et huitième ( $[T_{A2}^1]$ ) intervalles temporels respectivement ;

15                   c3) calcul par interpolation dudit troisième ( $[T_{AB}^1]$ ) intervalle temporel, à l'aide desdits premier ( $[T_B^1]$ ), septième ( $[T_{A1}^1]$ ) et huitième ( $[T_{A2}^1]$ ) intervalles temporels et desdites première ( $NT_B^1$ ), deuxième ( $NT_{A1}^1$ ) et troisième ( $NT_{A2}^1$ ) valeurs de la première référence temporelle commune (NT) ;

20                   et dans lequel l'étape d) comporte les opérations suivantes :

                  d1) détermination d'un neuvième ( $[T_{A1}^2]$ ) et d'un dixième ( $[T_{A2}^2]$ ) intervalle temporel, délimités par un sixième et septième couple de valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) respectivement et appartenant à la deuxième plage temporelle (P4), tels que ledit deuxième  
25 intervalle temporel ( $[T_B^2]$ ) est compris entre lesdits neuvième ( $[T_{A1}^2]$ ) et dixième ( $[T_{A2}^2]$ ) intervalles ;

                  d2) détermination d'une quatrième ( $NT_B^2$ ), cinquième ( $NT_{A1}^2$ ) et sixième ( $NT_{A2}^2$ ) valeur de la première référence temporelle commune (NT), comprises dans lesdits deuxième ( $[T_B^2]$ ), neuvième ( $[T_{A1}^2]$ ) et  
30 dixième ( $[T_{A2}^2]$ ) intervalles temporels respectivement ;

                  d3) calcul par interpolation dudit quatrième ( $[T_{AB}^2]$ ) intervalles temporels, à l'aide desdits deuxième ( $[T_B^2]$ ), neuvième ( $[T_{A1}^2]$ ) et

dixième ( $[T_{A2}^2]$ ) intervalle temporel et desdites quatrième ( $NT_B^2$ ), cinquième ( $NT_{A1}^2$ ) et sixième ( $NT_{A2}^2$ ) valeurs de la première référence temporelle commune (NT).

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'étape c)  
5 comporte les opérations suivantes :

c1) détermination d'une septième ( $T_{A1}^1$ ) et d'une huitième ( $T_{A2}^1$ ) valeur du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) appartenant à la première plage temporelle (P1), tels que ledit premier intervalle temporel ( $[T_B^1]$ ) est compris entre lesdites septième ( $T_{A1}^1$ ) et huitième ( $T_{A2}^1$ ) valeurs;

10 c2) détermination d'une première ( $[NT_B^1]$ ), deuxième ( $[NT_{A1}^1]$ ) et troisième ( $[NT_{A2}^1]$ ) intervalle de valeurs de la première référence temporelle commune (NT), comprenant ledit premier intervalle temporel ( $[T_B^1]$ ) et lesdites septième ( $T_{A1}^1$ ) et huitième ( $T_{A2}^1$ ) valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) respectivement;

15 c3) calcul par interpolation dudit troisième ( $[T_{AB}^1]$ ) intervalle temporel, à l'aide dudit premier intervalle ( $[T_B^1]$ ) de valeurs du temps ( $T_B$ ) de la première horloge ( $H_B$ ), desdites septième ( $T_{A1}^1$ ) et huitième ( $T_{A2}^1$ ) valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) et desdits premier ( $[NT_B^1]$ ), deuxième ( $[NT_{A1}^1]$ ) et troisième ( $[NT_{A2}^1]$ ) intervalles de valeurs de la première  
20 référence temporelle commune (NT) ;

et dans lequel l'étape d) comporte les opérations suivantes :

d1) détermination d'une neuvième ( $T_{A1}^2$ ) et d'une dixième ( $T_{A2}^2$ ) valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) appartenant à la deuxième plage temporelle (P4), tels que ledit deuxième intervalle temporel  
25 ( $[T_B^2]$ ) est compris entre lesdites neuvième ( $T_{A1}^2$ ) et dixième ( $T_{A2}^2$ ) valeurs ;

d2) détermination d'un quatrième ( $[NT_B^2]$ ), cinquième ( $[NT_{A1}^2]$ ) et sixième ( $[NT_{A2}^2]$ ) intervalle de valeur de la première référence temporelle commune (NT), comprenant ledit deuxième ( $[T_B^2]$ ) intervalle temporel et lesdites neuvième ( $T_{A1}^2$ ) et dixième ( $T_{A2}^2$ ) valeurs du temps ( $T_A$ )  
30 de la deuxième horloge ( $H_A$ );

d3) calcul par interpolation dudit quatrième ( $[T_{AB}^2]$ ) intervalle temporel, à l'aide dudit deuxième intervalle ( $[T_B^2]$ ) de valeurs du temps ( $T_B$ ) de

la première horloge ( $H_B$ ), desdites neuvième ( $T_{A1}^1$ ) et dixième ( $T_{A2}^1$ ) valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) et desdits quatrième ( $[NT_B^1]$ ), cinquième ( $[NT_{A1}^1]$ ) et sixième ( $[NT_{A2}^1]$ ) intervalles de valeurs de la première référence temporelle commune (NT).

5                   4. Procédé selon la revendication 2, dans lequel l'opération c3) est effectuée en remplaçant lesdites première ( $NT_B^1$ ), deuxième ( $NT_{A1}^1$ ) et troisième ( $NT_{A2}^1$ ) valeurs de la référence temporelle commune (NT) par des intervalles temporels ( $[NT_B^1]$ ,  $[NT_{A1}^1]$ ,  $[NT_{A2}^1]$ ) dont la largeur est égale à la discrétisation de la première référence temporelle commune (NT) sur la  
10 première plage temporelle (P1),

et dans lequel l'opération d3) est effectuée en remplaçant lesdites quatrième ( $NT_B^2$ ), cinquième ( $NT_{A1}^2$ ) et sixième ( $NT_{A2}^2$ ) valeurs de la référence temporelle commune (NT) par des intervalles temporels ( $[NT_B^2]$ ,  $[NT_{A1}^2]$ ,  $[NT_{A2}^2]$ ) dont la largeur est égale à la discrétisation de la première  
15 référence temporelle commune (NT) sur la deuxième plage temporelle (P4).

5. Procédé selon la revendication 3, dans lequel les opérations c3) et d3) sont effectuées en remplaçant lesdites septième ( $T_{A1}^1$ ), huitième ( $T_{A2}^1$ ), neuvième ( $T_{A1}^2$ ) et dixième ( $T_{A2}^2$ ) valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) par des intervalles temporels ( $[T_{A1}^1]$ ,  $[T_{A1}^2]$ ,  $[T_{A2}^1]$ ,  
20  $[T_{A2}^2]$ ) dont la largeur est égale à la discrétisation du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ).

6. Procédé selon la revendication 2 ou 4 dans lequel, pendant la ou les plages temporelles (P1, P4) sur lesquelles existe une première référence temporelle commune (NT), on enregistre à plusieurs  
25 reprises une première lecture de la première horloge (TL1 – FHB), suivie par une lecture de la première référence temporelle commune (TR – FHB) et ensuite par une deuxième lecture de la première horloge (TL2 – FHB), et de manière indépendante on enregistre, également à plusieurs reprises, une première lecture de la deuxième horloge (TL1 – FHA), suivie par une lecture  
30 de la première référence temporelle commune (TR – FHA) et ensuite par une deuxième lecture de la deuxième horloge (TL2 – FHA), et dans lequel les

opérations c1), c2), c3), d1), d2) et d3) sont effectuées à l'aide de ces enregistrements.

7. Procédé selon la revendication 3 ou 5 dans lequel, pendant la ou les plages temporelles (P1, P4) sur lesquelles existe une première référence temporelle commune (NT), on enregistre à plusieurs reprises une première lecture de la première référence temporelle commune (NT), suivie par une lecture de la première horloge ( $H_B$ ) et ensuite par une deuxième lecture de la première référence temporelle commune (NT), et de manière indépendante on enregistre, également à plusieurs reprises, une première lecture de la première référence temporelle commune (NT), suivie par une lecture de la deuxième horloge ( $H_A$ ) et ensuite par une deuxième lecture de la première référence temporelle commune (NT), et dans lequel les opérations c1), c2), c3), d1), d2) et d3) sont effectuées à l'aide de ces enregistrements.

8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7 dans lequel l'étape e) s'effectue par interpolation linéaire par intervalles ou par extrapolation linéaire par intervalles.

9. Procédé selon l'une des revendications 2 à 7, ou 8 lorsque cette dernière dépend des revendications 2 ou 3, dans lequel les opérations c3) et d3) s'effectuent par interpolation linéaire par intervalles.

10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9 dans lequel la première référence temporelle (NT) commune à la première et à la deuxième horloge existe sur au moins deux plages temporelles distinctes (P1, P4) et peut comporter une rupture de monotonie d'une plage temporelle à l'autre, une deuxième référence temporelle commune monotone (TMR - NMR) étant utilisée afin de résoudre les ambiguïtés qui résultent de la non-monotonie de la première référence temporelle commune (NT).

11. Procédé de synchronisation des données enregistrées et datées par une première machine (B), ayant une première horloge ( $H_B$ ), par rapport au temps local d'une deuxième machine (A), ayant une deuxième horloge ( $H_A$ ), caractérisé en ce que la datation s'effectue en associant à chaque donnée enregistrée par la première machine un cinquième intervalle

temporel ( $[T_B]$ ), délimité par un troisième couple de valeurs du temps ( $T_B$ ) de la première horloge ( $H_B$ ), et en ce que la synchronisation s'effectue en déterminant, par un procédé selon l'une des revendications 1 à 10, un sixième intervalle temporel ( $[T_{AB}]$ ), délimité par un troisième couple de valeurs du temps ( $T_A$ ) de la deuxième horloge ( $H_A$ ) et contenant ledit cinquième intervalle temporel ( $[T_B]$ ).

12. Procédé selon la revendication 11 dans lequel la première référence temporelle commune (NT) est fournie par une horloge ( $H_{BUS}$ ) d'un bus (BUS) qui relie au moins temporairement lesdites première et deuxième machines.

13. Procédé selon l'une des revendications 11 ou 12, qui se décompose en un premier sous-procédé d'enregistrement de lectures d'horloges selon la revendication 6 ou 7, effectué localement par chaque machine dont on veut pouvoir synchroniser les données, et un deuxième procédé de synchronisation proprement dite, effectué par une machine vers laquelle des données ont été transférées après la fin de la session d'enregistrement des données.

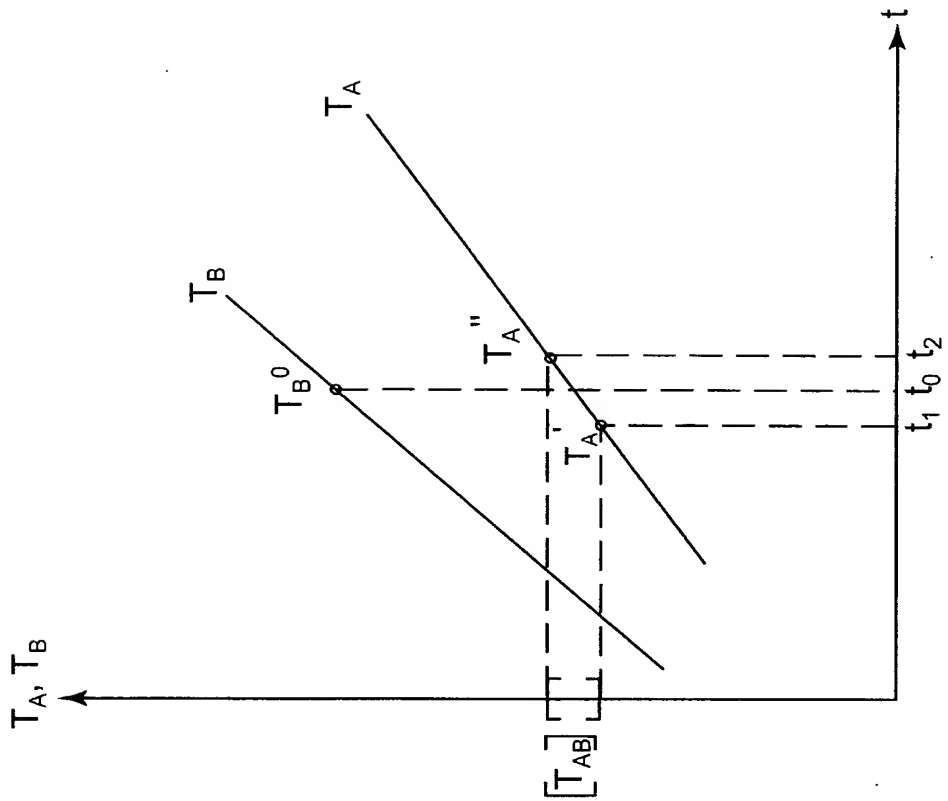


Fig. 1B

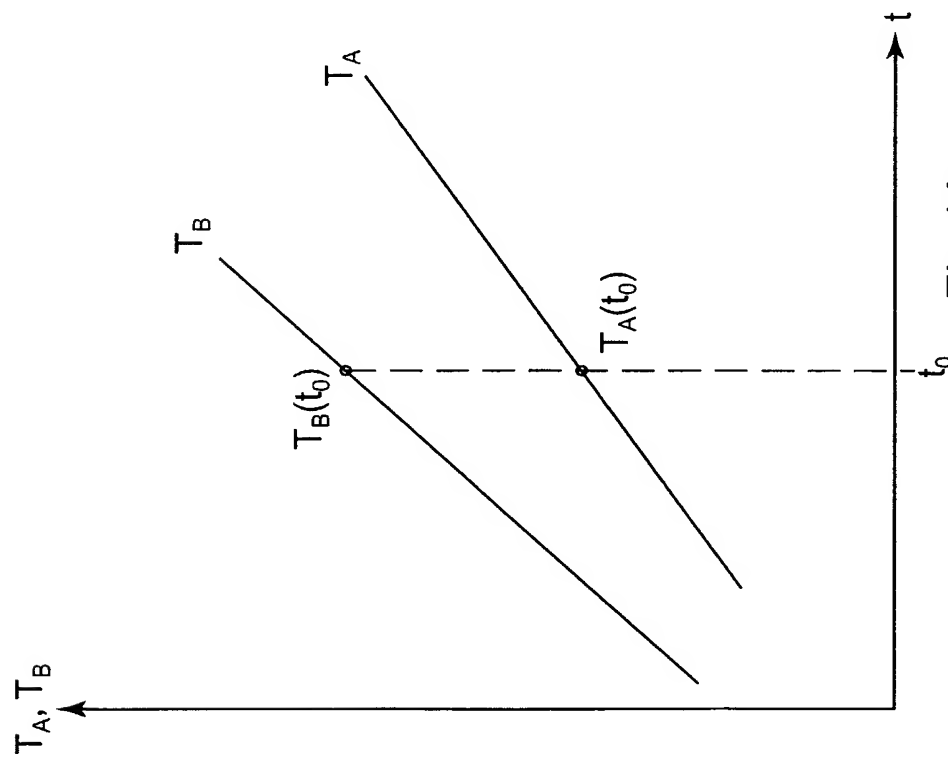
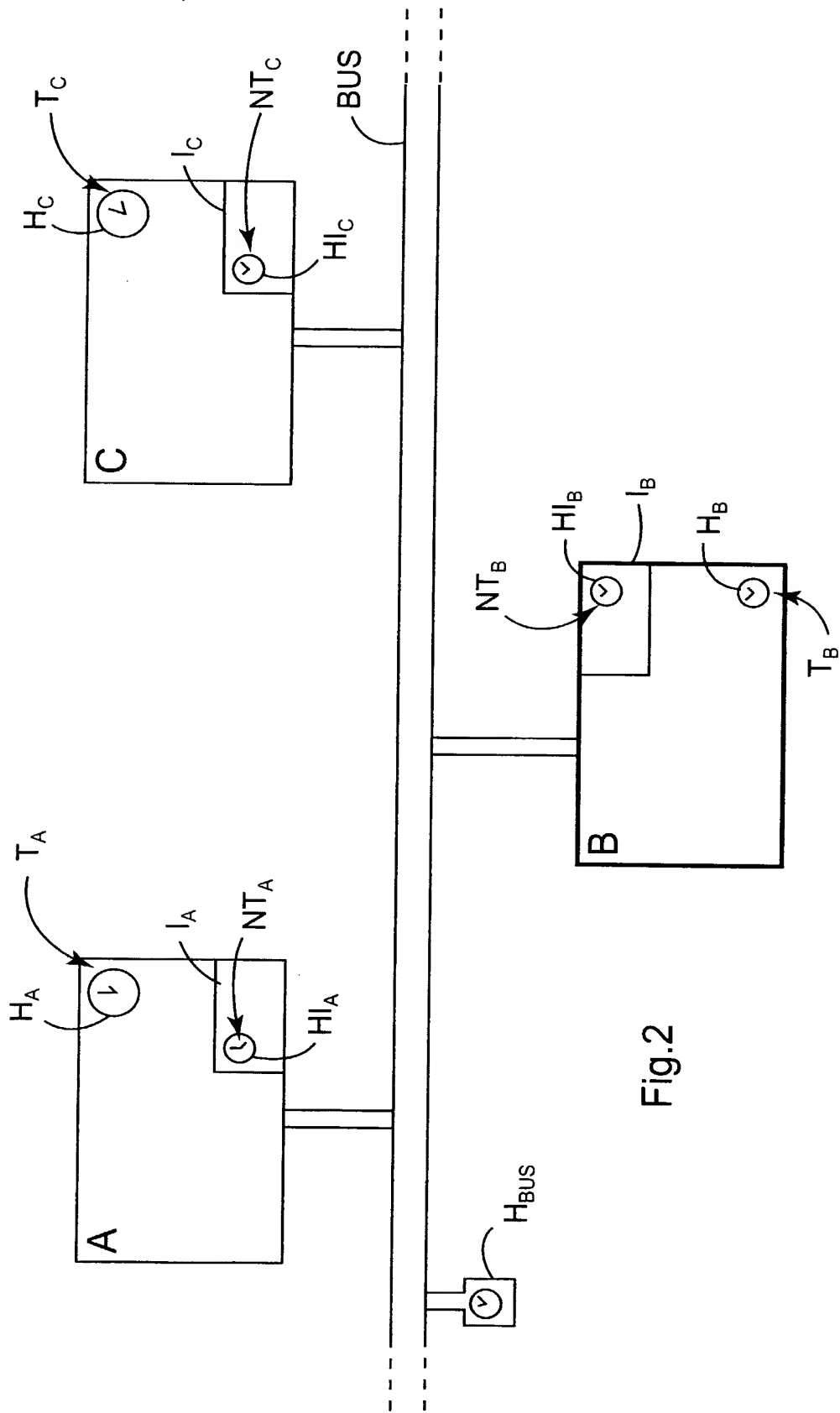
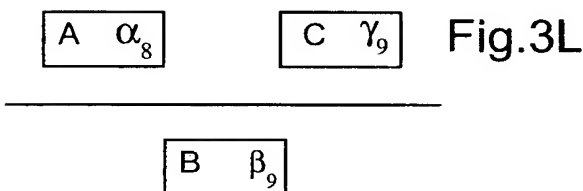
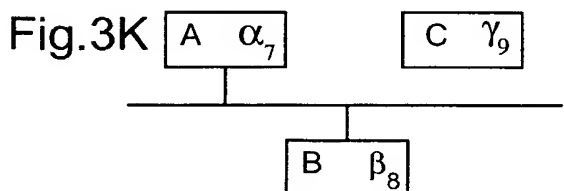
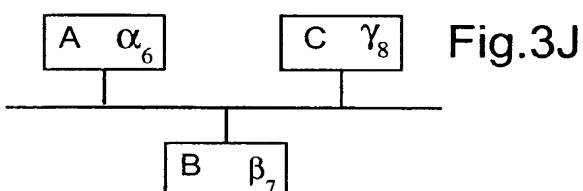
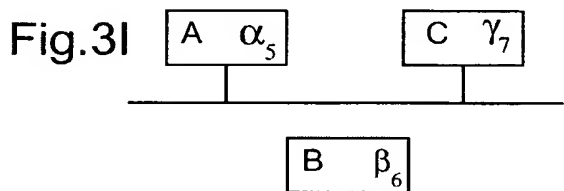
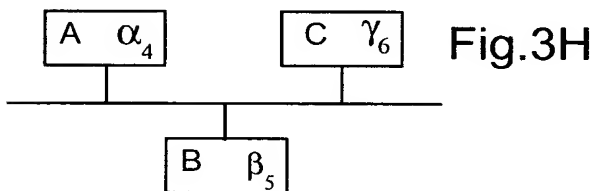
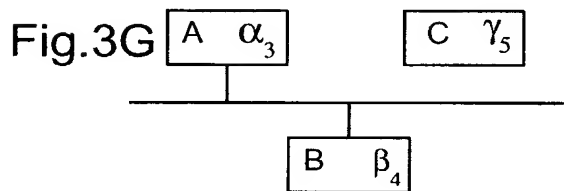
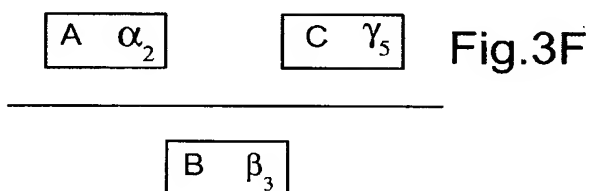
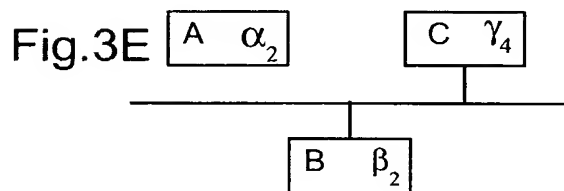
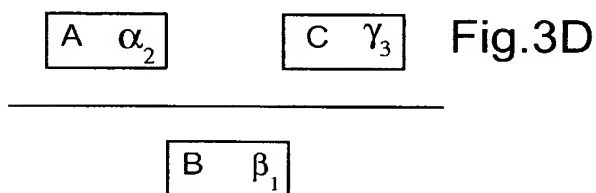
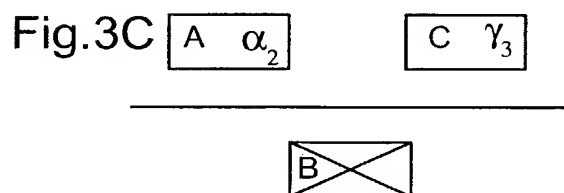
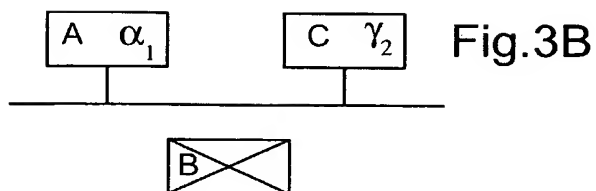
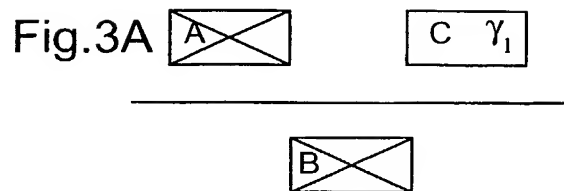


Fig. 1A



3/5





4/5

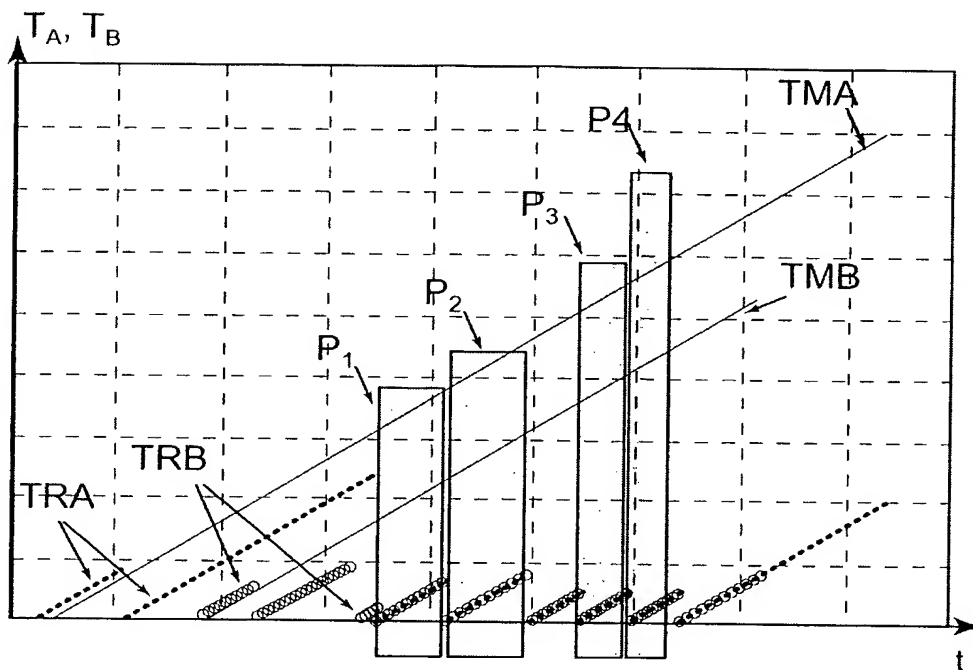


Fig.4

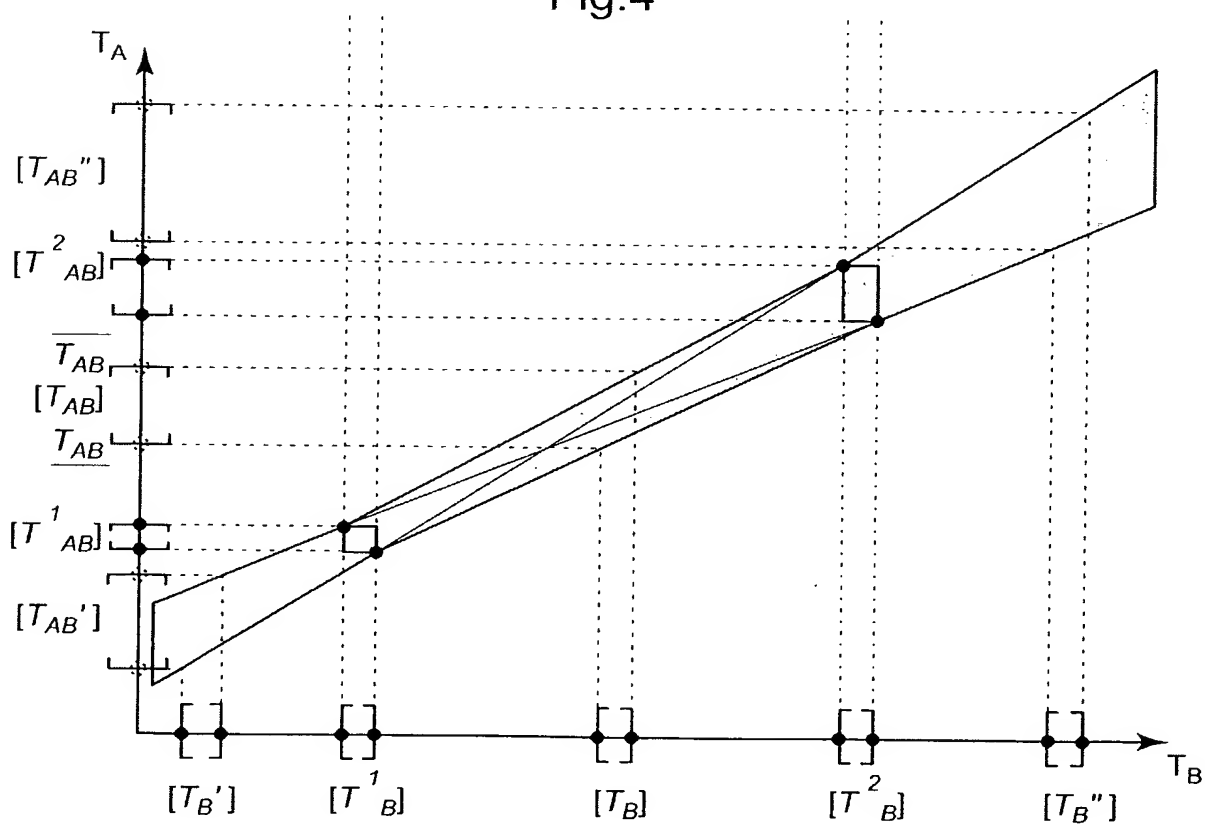


Fig.5

5/5

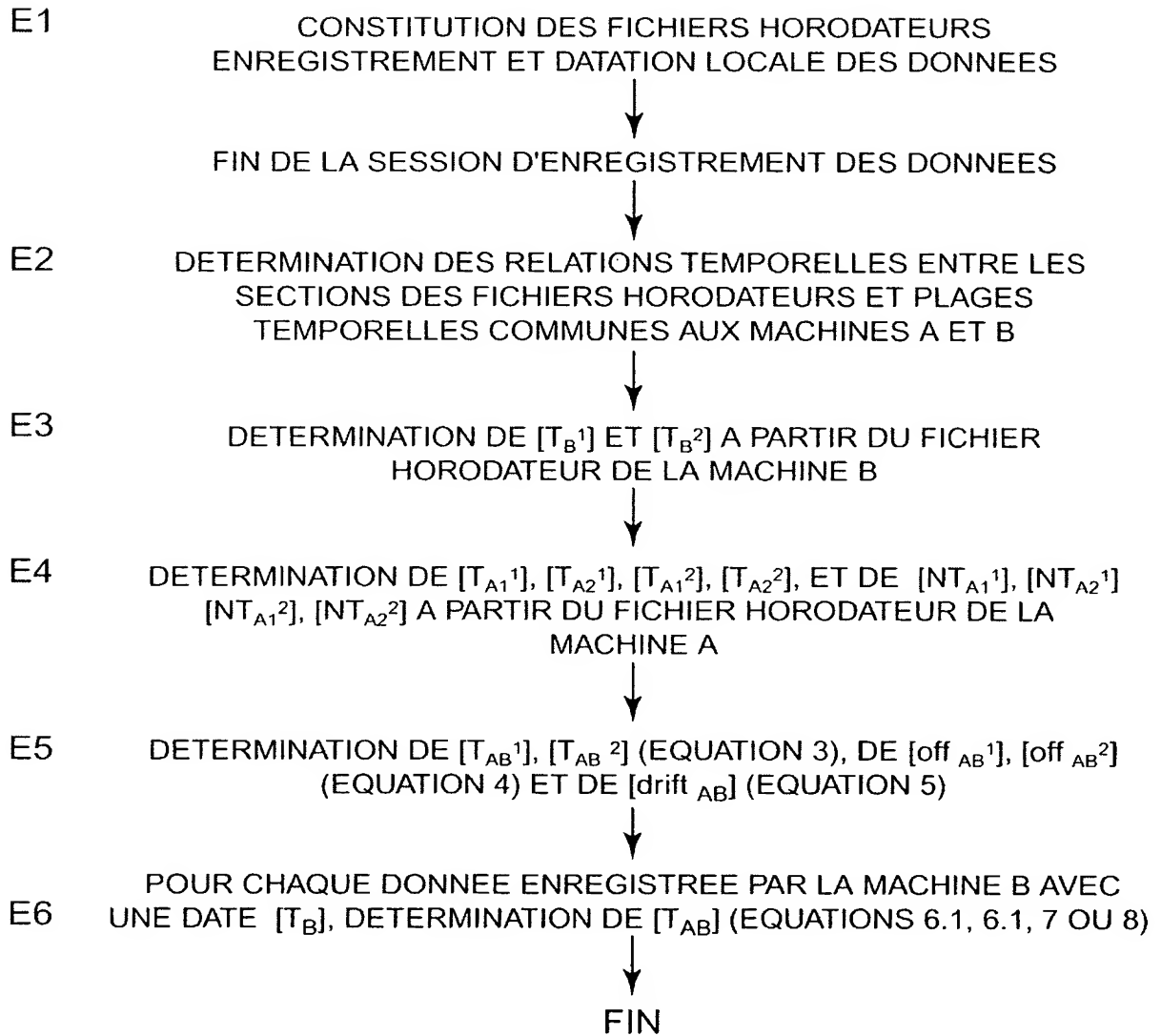


Fig.6